青土湖退耕地植被群落特征与土壤理化性质分析

何洪盛[1]， 田 青[1]， 王理德[1,2]， 孟存宏[3]， 何芳兰[2]， 郭春秀[2]， 吴 昊[2]

(1. 甘肃农业大学林学院,甘肃 兰州 730070； 2. 甘肃省治沙研究所,甘肃 兰州 730070；
3. 甘肃省武威市石羊河林业总场,甘肃 民勤 733399)

摘 要： 选取不同年限退/弃耕地(退耕1 a、2 a、4 a、8 a、13 a、20 a、30 a、40 a和CK)为研究对象,采用时空替代法,分析了不同年限退/弃耕地植被群落特征和土壤理化性质及其相关性。结果表明:(1) 石羊河下游青土湖退/弃耕地40 a的植被恢复过程中,9个样方共出现15科29属43种植物,退/弃耕地物种构成表现为:多数种属于少数科、少数种属于多数科。植被演变分为:一年生草本和多年生植物快速生长期(1~2 a),一年生草本向多年生草本演变期(2~8 a),多年生草本向灌木演变期(8~20 a)和以灌木为主的稳定期(20~40 a);(2) 随退耕年限增加,土壤含水量呈先减小后增加最后波动式减小趋势,上层土壤含水量高于下层土壤含水量。各样方比例最大是细砂粒,粉粒次之,比例最小的是粗砂粒和黏粒,随退耕年限的变化,各粒径占比变化不大;(3) 随退耕年限增加,土壤全氮和有机质均呈下降趋势,速效钾含量呈先增加后减小趋势,速效磷含量呈先减小后增加再减小趋势,表聚现象明显;(4) 植被群落演替与土壤理化性质具有密切相关性。Margalef丰富度指数与土壤全氮和有机质呈极显著正相关关系,Shannon多样性指数与土壤容重和细砂粒呈显著的正相关关系,与土壤黏粒和粉粒呈显著负相关关系。退耕第4 a是青土湖退/弃耕地在恢复治理过程中关键时期。

关键词： 青土湖； 退/弃耕地； 植被群落特征； 土壤理化性质

青土湖位于石羊河下游,地理坐标为103°35′03″~107°37′54″E,39°01′49″~39°03′29″N,总面积3.30×10^4 hm^2,曾是甘肃省民勤境内最大的湖泊,后因绿洲内地表水急剧减少,导致地下水位下降幅度较大,使得退耕区次生草地面积不断增加,植被以矮化木本、半木本或肉质泌盐荒漠植被为主,形成稀疏的植物群落。石羊河下游地区的盐渍化、植被退化和土地沙化等一些生态环境问题逐渐严重,制约着当地的经济发展[1]。近十几年来,在石羊河流域生态环境治理项目的实施过程中,当地政府采取的关井压田措施使得部分农田停止耕作。退/弃耕地面积大幅度增加,如今如何及时治理、改善、修复、遏制退/弃耕地沙化,解决当地的生态环境恶化,成为当地政府及科研人员面前的一道难题。

土壤是构成生态系统的要素,既是植物生长发育所需水分、养分及热量的载体,也是反映土壤结构和水文状况及评价土壤质量的重要指标[2]。土壤粒度、土壤容重、含水量和机械组成等物理性质的变化和差异,可以用来判断土地变化和演替过程[3],并且为退/弃耕地管理提供科学依据。

姚宝辉等[4]对甘南高寒草甸退化过程中土壤理化性质和微生物数量动态变化进行了研究,柴晓虹等[5]对石羊河中下游地区不同退耕年限次生草地土壤特性进行了研究,揭示了在不同退耕时间下,生物学特性的变化。赵富王等[6]在黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响研究发现,植物在影响土壤养分的分布上起着重要作用,植被恢复是退化生态系统恢复的主要途径[7]。马静利等[8]对于退化土地的生态影响、物理特性、植被以及生态系统变化进行了大量分析,分析表明:草原撂荒地随着时间延长而土壤养分流失、土壤容重增加、机械组成粗化。耕地在退/弃耕之后的变化趋势可

收稿日期：2020-05-06； 修订日期：2020-06-14
基金项目：国家自然科学基金项目(31760709, 31860175, 41801102);甘肃省民生专项(20CX4FH018);甘肃省青年科技基金项目(18JR3RA019)资助
作者简介：何洪盛(1994-),男,硕士研究生,主要从事水土保持与荒漠化防治研究. E-mail: 1178042655@qq.com
通讯作者：田青. E-mail: tqing@gsau.edu.cn

以对整个绿洲生态系统的稳定产生直接影响。因此，实施合理管理退/弃耕地，确保当地生态的稳定。植被群落是生物群体和环境条件共同驱动形成的集合，土壤作为植物生长的重要基础，其理化性状会对植物的生长、组成、分布和植物群落特征等产生多方面和多尺度的影响。因此，明确退耕地植被群落特征与土壤之间的关系和作用机制，有助于深入理解退耕地次生草地植被群落的演替、土壤生态及生态环境变化与发展过程，对于退耕地植被恢复与利用亦具有重要的意义。

本研究通过分析不同年限退/弃耕地的土壤理化性质和植被群落特征，探讨植被群落和土壤理化性质的相关性，揭示其变化规律驱动机制，旨在为该地区退/弃耕地的植被恢复与利用以及生态系统的持续健康发展提供科学依据。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省民勤县青土湖退/弃耕地，海拔1302~1314 m，地理位置为103°35′9.84″~103°37′55.49″N、39°01′44.11″~39°03′57.53″E，样地附近已人为干扰。年日照时数2832.1 h；土壤类型以灰棕漠土为主。年均温度7.5 ℃，极端最低气温为−28.8 ℃，极端最高气温为38.1 ℃，昼夜温差较大；年平均风速2.3 m·s^{-1}；年均降水量115 mm，年内降水分布不均匀，7、8、9月集中了全年72%的降雨量；年均蒸发量为2644 mm；植被主要为耐盐碱性植物，有盐爪爪（*Kalidium foliatum*）、黑果枸杞（*Lycium ruthenicum*）、碱蓬（*Suaeda glauca*）和骆驼蓬（*Peganum harmala*）。

1.2 样地布设及植被调查

2018年9月，通过走访当地群众和查阅退/弃耕土地使用记录，在研究区内选择地形、水资源等自然条件相近，人为干扰较少，退/弃耕地时间为1 a、2 a、4 a、8 a、13 a、20 a、30 a、40 a的土地为试验样地，以没有退耕农田为对照样地（CK）。测量并详细记录样方的地理坐标、海拔高度、土壤类型及群落优势种（表1）。每个样地面积为100 m×100 m，在每个样地中心和四角分别布设5个10 m×10 m的灌木样方，调查并记录灌木的高度、个体数、冠幅以及盖度等指标；再将每个10 m×10 m的灌木样方中心和四角各设置1个1 m×1 m草本样方，调查并记录草本的高度、个体数和盖度。

1.3 土壤采集

在9个不同退耕年限样地内（包括对照样地），运用S形方法布设5个点进行采集土样，因民勤退耕地植物根系分布在40 cm以上，故上、下分2个土

表1 不同年代退耕地自然植被地理状况

Tab. 1 Geographical conditions of natural vegetation in abandoned farmland in different years

样地编号	群落优势种	退耕年限/a	经纬度	海拔/m	土壤类型
1	地肤+中亚滨藜 (*Kochia scoparia* + *Atriplex centralasiatica*)	1	103°35′07″ E 39°03′57″ N	1306	沙漠灰棕土
2	盐生草+地肤+中亚滨藜 (*Halogeton glomeratus*+ *Kochia scoparia* + *Atriplex centralasiatica*)	2	103°35′10″ E 39°03′50″ N	1306	
3	碱蓬+地肤+芨芨草+小果白刺 (*Suaeda glauca*+*Kochia scoparia*+*Achnatherum splendens*+*Nitraria sibirica*)	4	103°35′10″ E 39°03′50″ N	1308	
4	小果白刺+黑果枸杞 (*Nitraria sibirica*+ *Lycium ruthenicum*)	8	103°36′08″ E 39°03′25″ N	1305	
5	黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum*)	13	103°36′18″ E 39°02′30″ N	1306	
6	黑果枸杞 (*Lycium ruthenicum*)	20	103°37′01″ E 39°01′44″ N	1308	
7	黑果枸杞+盐爪爪 (*Lycium ruthenicum*+ *Kalidium foliatum*)	30	103°37′29″ E 39°02′54″ N	1302	
8	黑果枸杞+盐爪爪 (*Lycium ruthenicum*+ *Kalidium foliatum*)	40	103°37′55″ E 39°02′54″ N	1302	
9	茴香(*Foeniculum vulgare*)	CK	103°35′14″ E 39°03′52″ N	1308	

层（0~20 cm、20~40 cm）采集土壤样本，将同一退耕年限的5个样点采集的土样进行区分，同一土层所采取的土样混合为1个土样，分为3个重复样本，将土壤样本装入自封PC袋，迅速带回实验室，把石头和植物根系等部分杂物去除后过2 mm筛，放置在4 ℃冰箱内。

1.4 测定方法

1.4.1 土壤理化性质的测定　土壤含水量的测定：以重量百分数表示土壤含水量，用土壤中所含水分重量占烘干土重的百分数表示，计算公式为：

土壤含水量（重量%）=（原土重−烘干土重）/烘干土重×100%=水重/烘干土重×100%

采用环刀法分层测定土壤容重：土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定；土壤全磷含量采用钼蓝比色法，UV2800分光光度计（上海）测定；土壤有机碳含量采用 $K_2Cr_2O_7$ 容量法测定；土壤pH采用pH仪（PHS−3S）；砂粒含量采用马尔文激光粒度仪（Malvern Mastersizer 2000）测定。

1.4.2 植被指数测定　Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数、Simpson优势度指数和Margalef丰富度指数的计算公式分别为：

Shannon多样性指数：$$H=-\sum_{i=1}^{s}P_i\ln P_i$$

Pielou均匀度指数：$$E=\frac{H}{\ln S}$$

Simpson优势度指数：$$C=\sum_{i=1}^{s}\frac{N_i(N_i-1)}{N(N-1)}$$

Margalef丰富度指数：$$D_{MG}=\frac{S-1}{\ln N}$$

式中：P_i是频度；S是种群数目；N_i是第i个类群的个体数；N是所有类群的总个体数。

1.5 数据处理

采用SPSS 19.0软件进行方差分析、相关性分析。

2 结果与分析

2.1 不同年限耕地植被群落的变化特征

由表2可知，试验区植被演替过程中，退/弃耕地1~40 a的9个样方内共出现15科29属43种植物。退耕1 a的样方内共出现20种不同植物，以一年生草本植物为主，主要有地肤、中亚滨藜等；退耕2 a的样方内共出现19种不同植物，地肤、盐生草和中亚滨藜等一年生植物成为群落优势种，多年生草本和灌木开始出现，Shannon多样性指数和Pielou均匀度指数在1~4 a里逐渐增加，Margalef丰富度指数先减小后增加，在退耕第4 a达到峰值，Simpson优势度指数则呈减小趋势；退耕8~13 a样方内植物种类减少较为明显，为14种，灌木和多年生植物占比增加，优势种中开始出现多年生草本和灌木，Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数在退耕4~13 a里逐渐减小；退耕20 a的样方内出现的植物种类数为13种，数量逐渐增多的是灌木植物，群落优势种为黑果枸杞；退耕30 a的样方内共出现了6种不同植物，群落优势种由盐爪爪、黑果枸杞和红砂（*Reaumuria songarica*）构成；退耕40 a的样方内共出现8种不同植物，形成灌木植被群落，优势种由黑果枸杞和盐爪爪构成。Shannon多样性指数在退耕13~40 a呈先增加后减小最后趋于稳定趋势，Margalef丰富度指数则是逐渐减小最后趋于稳定，Pielou均匀度指数逐渐增大最后趋于稳定，Simpson优势度指数变化幅度相对较小并且稳定，趋势不明显。

2.2 不同年限退/弃耕地的土壤物理性质的变化

2.2.1 不同年限退/弃耕地土壤容重和含水量变化　由表3可知，随着退耕年限的不断延长，0~20 cm土

表2　物种多样性随退耕年限的变化

Tab. 2　Variation of species diversity with the number of years of returning farmland

多样性指数	退耕年限/a							
	1	2	4	8	13	20	30	40
个体数(N)	1125	1516	405	863	2172	3455	567	652
种群数(S)	20	19	20	14	14	13	6	8
Shannon多样性指数	1.81	2.576	3.447	2.481	1.839	2.194	1.652	2.221
Pielou均匀度指数	0.419	0.606	0.798	0.652	0.483	0.593	0.639	0.74
Simpson优势度指数	0.409	0.234	0.112	0.239	0.412	0.277	0.335	0.251
Margalef丰富度指数	1.875	1.704	2.194	1.333	1.173	1.021	0.547	0.749

表3 土壤容重和含水量随退耕年限的变化

Tab. 3 Changes in soil bulk density and water content with the number of years of returning farmland

退耕年限/a	含水量		容重	
	0~20 cm	20~40 cm	0~20 cm	20~40 cm
1	0.078±0.007cde	0.088±0.012abc	1.51±0.13bc	1.52±0.13b
2	0.074±0.003de	0.078±0.007bcd	1.53±0.1bc	1.68±0.03ab
4	0.07±0.017de	0.065±0.006bcd	1.68±0.03b	1.62±0.04ab
8	0.059±0.005e	0.06±0.006cd	1.6±0.05ab	1.61±0.01ab
13	0.126±0.031a	0.115±0.019a	1.29±0.16d	1.62±0.08ab
20	0.094±0.011abc	0.066±0.035ab	1.38±0.05bc	1.64±0.16ab
30	0.103±0.016de	0.093±0.016d	1.45±0.04bc	1.57±0.1ab
40	0.068±0.008bcd	0.053±0.011bcd	1.48±0.06cd	1.54±0.11ab
0	0.11±0.01ab	0.117±0.015a	1.73±0.04a	1.7±0.05a

注:同行不同字母表示差异显著(P<0.05)。下同。

层,土壤容重在退耕1~4 a逐渐增大,在4~13 a逐渐减小,在13~40 a有增大趋势且趋于稳定;20~40 cm土层,土壤容重在退耕1~2 a增大,退耕1 a土壤容重达到极小值,在退耕2~40 a逐渐减小且趋于稳定,变化差异不显著。除20~40 cm土层容重随退耕年限变化差异不显著外,其他土层容重和含水量都随退耕年限变化差异显著(P<0.01)。在0~20 cm土层,土壤含水量在退耕1~8 a逐渐减少,第8 a达到极小值5.9%,第13 a达到峰值12.6%,随后在退耕13~40 a土壤含水量呈波动式减少,最后趋于稳定;在20~40 cm土层中变化趋势与0~20 cm土层相似,退耕1~8 a,土壤含水量空间分布为表层均低于或者约等于深层,其他年限土壤含水量空间分布则是表层高于深层。

2.2.2 不同年限退/弃耕地土壤粒径变化 不同年限退/弃耕地0~40 cm土壤机械组成如表4所示,细砂粒含量都在50%以上,最大达到83.4%,黏粒含量均低于10%。随着退耕年限的变化,各粒径所占比例有所不同,在0~20 cm土层,退耕1~2 a细砂粒增加至峰值83.4%,黏粒、粉粒和粗砂粒均下降至极小值;退耕2~4 a四种砂粒占比变化幅度不明显;退耕4~8 a细砂粒占比显著下降至57.7%,粉粒和黏粒显著上升至29.1%和7.6%。粗砂粒呈下降趋势但变化并不显著;退耕8~40 a四种砂粒趋于稳定,其变化幅度均不显著。在20~40 cm土层,在退耕1 a细砂粒处于峰值80.2%,粉粒、黏粒均处于极小值7.3%、1.5%;在退耕1~13 a,细砂粒随退耕时间延长呈下降趋势,13 a下降至极小值48.1%,然后逐渐稳定。粗砂粒则呈先下降后增加再下降后增加趋势,退耕13 a达到极大值11.3%,20 a出现极小值1.5%。粉粒和黏粒在此期间呈逐渐增加趋势并在13 a达到峰值32.7%和7.9%,然后呈下降趋势,20 a以后趋于稳定。总体看来,各样方占比最大的是细砂粒,其次是粉粒,占比最小的是粗砂粒和黏粒,随退耕年限的变化,各粒径占比变化不大。

2.3 不同年限退/弃耕地土壤化学性质的变化

由表5可知,随退耕年限的增加,土壤全氮含量

表4 土壤粒径随退耕年限的变化

Tab. 4 Changes in soil particle size with the number of years of returning farmland

指标	深度/cm	退耕年限/a								
		1	2	4	8	13	20	30	40	CK
黏粒/%	0~20	6.5b	1.4d	1.5d	7.6a	7.1ab	7.4a	7ab	5.8c	5.5c
	20~40	1.5e	4.5d	5.5ab	7.6a	7.9bc	7.1bc	7.1d	5.7c	6.7f
粉粒/%	0~20	20.9c	6.8d	7.3d	29.1ab	30.5a	30.3a	30.5a	26.9b	20.c
	20~40	7.3c	20.1c	20.2a	31.9a	32.7a	31.2a	30.2b	25.5c	22d
细砂粒/%	0~20	61.9b	83.4a	82.8a	57.7bc	60.3b	54.2c	59.3b	62b	59.7b
	20~40	80.2b	66.4bc	64d	57.9e	48.1cd	60.3d	56.4cd	60.3cd	60.6a
粗砂粒/%	0~20	10.7ab	8.4abc	8.4abc	5.7bc	2c	8.1abc	3.1bc	5.3bc	14.1a
	20~40	11abc	9ab	10.3bc	2.6a	11.3c	1.5abc	6.3abc	8.4a	10.6a

表5　土壤化学性质随退耕年限的变化

Tab. 5　Variation of soil physical and chemical properties with the number of years of returning farmland

指标	深度/cm	退耕年限/a								
		1	2	4	8	13	20	30	40	CK
全氮/%	0~20	0.032c	0.024a	0.036bc	0.025c	0.022c	0.018c	0.018c	0.017c	0.023ab
	20~40	0.029bc	0.022ab	0.026bc	0.021c	0.021d	0.017cd	0.015cd	0.018c	0.021a
速效钾/(mg·kg^{-1})	0~20	142ab	159ab	148b	234a	411ab	393a	199a	337ab	227c
	20~40	132cd	152d	112cd	154a	377bc	393bc	262ab	263cd	189d
速效磷/[mg·(100g)$^{-1}$]	0~20	1.4bcd	0.96bcd	1.04bcd	1.1b	1.48cd	0.9d	0.76bcd	0.51a	3.88bc
	20~40	0.53b	0.2ab	0.26ab	0.5a	0.73ab	0.57ab	0.33ab	0.43ab	0.54
有机质/%	0~20	1.27bc	1.16a	1.35cd	1.06de	0.93e	0.77e	0.83e	0.84abc	1.23ab
	20~40	1.26cd	0.90bc	0.92b	0.93bcd	0.87bcd	0.71d	0.79cd	0.69b	1.00a

在上、下土层,均呈上升趋势,在4 a到达峰值,分别为0.036%和0.026%,随后在4~40 a间逐渐下降,最后趋于稳定趋势;速效钾呈上升趋势,2个土层峰值分别出现在第13 a的411 mg·kg^{-1}和20 a的393 mg·kg^{-1},随后总体呈逐渐下降趋势并趋于稳定;速效磷含量在0~40 cm土层在退耕1~2 a和13~40 a呈下降趋势,在2~13 a呈上升趋势,且在13 a出现极大值1.78 mg·(100g)$^{-1}$和0.73 mg·(100g)$^{-1}$;有机质含量在0~20 cm土层中呈上升趋势,且在4 a到达峰值1.35%,随后逐渐下降且在20 a出现极小值0.77%,最后逐渐上升趋于稳定。在20~40 cm土层1~2 a和8~20 a呈下降趋势,2~8 a和20~30 a呈上升趋势,最后逐渐下降趋于稳定。土壤pH呈先上升后下降趋势,上、下土层pH峰值分别出现在退耕8 a和20 a。随着土层加深,土壤全氮、速效磷和有机质均呈降低趋势;速效钾除退耕1~30 a外,也呈降低趋势。

2.4　植被群落特征与土壤理化性质关系

2.4.1　植被群落多样性与土壤物理性质的相关性　样地内植被群落多样性指数和土壤物理性质的相关性分析表明(表6),4种多样性指数与土壤物理性质呈显著或极显著相关关系。其中,Shannon多样性指数与土壤容重和细砂粒呈显著的正相关关系($P<0.05$),与土壤粉粒及黏粒呈显著负相关关系($P<0.05$);Pielou均匀度指数与土壤物理性质相关性较弱,均不显著($P>0.05$);Simpson优势度指数与容重呈显著负相关关系($P<0.05$);Margalef丰富度指数与土壤粉粒呈显著负相关关系($P<0.05$)。

2.4.2　植被群落多样性与土壤化学性质的相关性　样地内植被群落多样性指数和土壤化学性质的相关性分析表明(表7),Pielou均匀度指数与土壤速效磷含量呈显著负相关关系($P<0.05$),Margalef丰富度指数与土壤全氮和有机质呈极显著正相关关系($P<0.05$),Shannon多样性指数和Simpson优势度指数与土壤化学性质相关性较弱,均不显著。

2.4.3　土壤理化性质的相关性　土壤物理性质和化学性质的相关性分析表明(表8),全氮含量与土壤粉粒呈显著正相关关系;速效钾含量与容重呈显著负相关关系,与粉粒呈显著正相关关系;速效磷与粗砂粒呈显著正相关关系;有机质与容重呈显著正相关关系,与粉粒呈显著负相关关系。

3　讨 论

石羊河下游青土湖退/弃耕地植被恢复过程中,9个样方共出现15科29属43种植物,退/弃耕地上

表6　植被群落多样性指数与0~20 cm土壤物理性质的相关性

Tab. 6　Correlation between vegetation community diversity and soil physical properties from 0 to 20 cm

	含水率	容重	黏粒	粉粒	细砂粒	粗砂粒
Shannon多样性指数	−0.582	0.757*	−0.749*	−0.726*	0.724*	0.392
Pielou均匀度指数	−0.493	0.59	−0.449	−0.291	0.385	−0.078
Simpson优势度指数	0.652	−0.756*	0.658	0.579	−0.6	−0.279
Margalef丰富度指数	−0.391	0.596	−0.641	−0.797*	0.685	0.697

注:*表示相关性在0.05水平上显著;**表示相关性在0.01水平上显著。下同。

表7　植被群落多样性与0~20 cm土壤化学性质的相关性

Tab. 7　Correlation between vegetation community diversity and soil chemical properties from 0 to 20 cm

	全氮	速效钾	速效磷	有机质
Shannon多样性指数	0.577	−0.346	−0.124	0.586
Pielou均匀度指数	0.018	−0.123	−0.710*	0.017
Simpson优势度指数	−0.294	0.302	0.48	−0.32
Margalef丰富度指数	0.931**	−0.591	0.525	0.947**

表8　0~20 cm土壤理化性质的相关性

Tab. 8　Correlation table of 0−20 cm soil physical and chemical properties

	含水率	容重	黏粒	粉粒	细砂粒	粗砂粒
全氮	−0.343	0.526	−0.515	−0.673*	0.576	0.403
速效钾	0.457	−0.676*	0.552	0.682*	−0.577	−0.447
速效磷	0.465	0.5	0.029	−0.081	−0.167	0.668*
有机质	−0.282	0.731*	−0.605	−0.771*	0.602	0.637

的物种构成表现为多数种属于少数科、少数种属于多数科。在不同年限退/弃耕地出现的主要植物具有较强的连续性。由表2可知，Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数在1~4 a不断增加，这说明退耕初期植被群落内物种种类在不断增加，退耕4 a后Margalef丰富度指数和Shannon多样性指数迅速下降，退耕20~40 a下降速度减缓趋于稳定；Simpson优势度指数总体表现与王方琳等[9]研究的石羊河下游民勤绿洲退/弃耕地植被自然演替特征及物种多样性分析中的结果相似，与李永强等[10]在草甸草原撂荒地演替过程中植被多样性指数变化研究中的结果不同，这可能是试验样地的差异造成的，本试验为干旱区退/弃耕地，退耕过程由草本植物向灌木演替，与草甸草原撂荒地上的植被演替有所区别，因此，导致结果并不相同。

土壤容重是反映退耕地土壤结构变化的主要物理性质指标之一[11]。研究表明，在青土湖退耕地演替过程中，土壤容重空间变化表现为：上层土壤容重总是小于下层，这与焦梦妍等[12]在自然恢复序列梯度上退耕地土壤研究，甘淼等[13]在黄土高原研究中的结果一致，主要是植被生长过程中有大量枝叶脱落，增加了地表凋落物及腐殖质层，从而降低了表层土壤容重。土壤含水量变化与柴晓虹等[14−15]在干旱荒漠区水分变化研究中的结果虽有一定的差异，但是总的变化趋势相似。本研究表明，退耕初期上层土壤含水量要低于下层土壤含水量，退耕13 a以后上层土壤含水量要高于下层土壤含水量，且与0~8 a相比，上、下层土壤含水量差异显著，这可能与植被演替有关。退耕初期，植被以一年生草本植物为主，其根系主要吸取土壤表层水分，使得表层土壤含水量低于深层土壤含水量；退耕8 a以后，植被群落优势种逐渐以灌木为主，根系影响深，使得深层土壤含水量低于表层土壤含水量；同时，蓄水保水性能相对提高，这也使得退耕13 a以后土壤含水量整体要高于退耕初期1~8 a土壤含水量。

土壤粒度特征不仅承载了土壤物理及化学性质，更是影响土壤水肥状况的关键因子[16−17]。根据国际制土壤质地分类标准[18]，将研究区土壤粒级分为：黏粒(<0.002 mm)，粉粒(0.002~0.02 mm)，细砂粒(0.02~0.2 mm)，粗砂粒(0.2~2 mm)，从不同年限退/弃耕地0~40 cm的机械组成来看，每个样方比例最大的是细砂粒，粉粒次之，比例最小的是粗砂粒和黏粒，随退耕年限的变化，各粒径占比变化不大。这与郭春秀等[19]在石羊河下游退耕地土壤研究中结果相一致，与宿婷婷等[20]在黄土丘陵典型草原研究中的结果不同，原因可能在于试验样地的不同；本文选择的样地是荒漠绿洲区退/弃耕地，由于气候、土质的差异以及地表植被类型的不同，特别是强大的风蚀作用，导致土壤粒径所占比例有差异。

土壤全氮、速效钾、速效磷和有机质在0~40 cm土层中表聚现象明显，这可能是地表植被落叶堆积形成枯枝落叶层，将土壤表层覆盖，枯落物分解产

生的养分聚集在土壤表层[21]，然后，随水或其他介质向下层扩散。土壤全氮变化与安慧等[22]在荒漠草原区弃耕地植被演替过程中结果一致。Shannon多样性指数、Pielou均匀度指数和Margalef丰富度指数在退耕4 a达到峰值，说明在退耕4 a植被数量和种类较多，且各植被数量较均匀，这为土壤表层的枯枝落叶层的累积提供了有利条件。随着植被群落中灌木逐渐增加，其根系影响较草本植物根系影响深，使得下层土壤全氮含量减少，而上层部分土壤全氮被草本植物根系所吸收，部分全氮向下层土壤扩散，因此，土壤全氮含量整体呈下降趋势，且上、下层土壤全氮差异逐渐减小。速效钾的变化趋势与隋媛媛等[23]在黄土丘陵区撂荒群落中的结果相一致，本试验中退耕1~2 a速效钾呈增加趋势，可能是因为退耕前的耕作积累导致的。速效磷含量变化差异不显著，其变化趋势与由政等[24]在退耕地植被演替过程中的结果相似，部分峰值出现的时间不同也可能与地表植被群落演替的差异型有关。随着土层加深，土壤有机质均呈降低趋势，这与唐梦迎等[25]在干旱区研究结果相同；土壤有机质含量变化趋势整体呈现"消耗—积累—稳定"趋势，退耕初期有机质含量较高，在此期间，地表植被多为一年生草本植物，对有机质的吸收需求较小，随着演替进程增加，植被由一年生草本植被向多年生草本植被和灌木演变，植被对有机质的吸收需求增加，退耕初期植物群落的枯落物回归作用非常微弱，土壤养分库处于流失状态。随后草本植物逐渐死亡，其根系在土壤中分解腐烂归还土壤，这对有机质含量增加有利，因此，有机质含量在退耕1~20 a整体呈下降趋势，在20~40 a呈逐渐上升并趋于稳定趋势，这与韩福贵等[26]在石羊河流域下游退/弃耕地研究中的结果相同。

在植被群落特征、土壤物理性质和土壤化学性质相关性的研究中发现，三者之间均存在不同程度的相关性关系。Margalef丰富度指数与有机质和土壤全氮呈极显著正相关关系，表明植被种类的增加对土壤养分的需求较高，相对于其他因子，土壤养分在植被种类的增加中所占比例较大；Shannon多样性指数与土壤容重和细砂粒呈显著正相关关系(P<0.05)，与土壤黏粒和粉粒呈显著负相关关系，这表明在植被生长发育过程的影响因子中，土壤粒径和容重所占比例较大。Simpson优势度指数与容重呈显著负相关关系，这与马瑞等[27]的研究结果相似，在植被恢复过程中，随地表凋落物和地下有机物（细根及根系分泌物）的大量增多，可以明显降低土壤容重[28]；Pielou均匀度指数与土壤速效磷含量呈显著负相关关系，这与王媚臻等[29]的研究结果相同，本文样地速效磷含量低，不足以满足地表灌木的吸收；当速效磷含量大幅度升高时，灌木对其吸收力度较强密度增大，从而限制其他草本植物的生长，导致均匀度降低。

全氮含量和土壤粉粒呈显著正相关关系，这与常海涛等[30]在退耕还林与还草研究结果相似，部分差异可能是植被群落不同导致。速效磷和粗砂粒呈显著正相关关系，这与肖鹏飞等[31]在成都平原区土壤速效磷研究结果相反，这可能是样方地和土地利用方式不同导致的。有机质和容重呈显著正相关关系，与粉粒呈显著负相关关系，这与吕文强等[32]在黄土高原的研究结果一致。

4 结 论

（1）石羊河下游青土湖退/弃耕地40 a的植被恢复过程中，9个样方共出现15科29属43种植物，物种构成表现为：多数种属于少数科、少数种属于多数科。植被演变分为：一年生草本和多年生植物快速生长期（1~2 a），一年生草本向多年生草本演变期（2~8 a），多年生草本向灌木演变期（8~20 a）和以灌木为主的稳定期（20~40 a）。

（2）随退耕年限增加，土壤含水量呈先减小后增加最后波动式减小趋势，退耕后期，上层土壤含水量高于下层土壤含水量。总体看来，各样方比例最大的是细砂粒，粉粒次之，比例最小的是粗砂粒和黏粒，随退耕年限的变化，各粒径占比变化不大。

（3）随退耕年限增加，土壤全氮和有机质均呈下降趋势，土壤速效钾含量呈先增加后减小趋势，速效磷含量呈先减小后增加再减小趋势，表聚现象明显。

（4）植被群落演替与土壤理化性质具有密切相关性。Margalef丰富度指数与土壤全氮和有机质呈极显著正相关关系，Shannon多样性指数与土壤容重和细砂粒呈显著的正相关关系，与土壤黏粒和粉粒呈显著负相关关系。退耕第4 a是青土湖退/弃耕地在恢复治理过程中的关键时期。

参考文献(References):

[1] 王蓓, 赵军, 仲俊涛. 2005—2015年石羊河流域生态系统服务时空分异[J]. 干旱区研究, 2019, 36(2): 474-485. [Wang Bei, Zhao Jun, Zhong Juntao. Spatiotemporal differentiation of ecosystem services in the Shiyang River Basin from 2005 to 2015[J]. Arid Zone Research, 2019, 36(2): 474-485.]

[2] 吴江琪, 马维伟, 李广, 等. 黄土高原4种植被类型对土壤物理特征及渗透性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(4): 133-138. [Wu Jiangqi, Ma Weiwei, Li Guang, et al. Effects of four vegetation types on soil physical characteristics and permeability in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(4): 133-138.]

[3] Chen X H, Duan Z H. Changes in soil physical and chemical properties during reversal of desertification in Yanchi County of Ningxia Hui autonomous region, China[J]. Environmental Geology, 2009, 57: 975-985.

[4] 姚宝辉, 王缠, 张倩, 等. 甘南高寒草甸退化过程中土壤理化性质和微生物数量动态变化[J]. 水土保持学报, 2019, 33(3): 138-145. [Yao Baohui, Wang Chan, Zhang Qian, et al. Dynamic characteristics of soil physicochemical properties and microbial quantity during the degradation of Gannan alpine meadow[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3): 138-145.]

[5] 柴晓虹, 王理德, 姚拓, 等. 石羊河中下游不同退耕年限次生草地土壤理化及生物学特性研究[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 24-34. [Chai Xiaohong, Wang Lide, Yao Tuo, et al. Effects of different years of cultivation abandonment on soil physical, chemical and microbial characteristics in the midstream and downstream of Shiyang River area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(8): 24-34.]

[6] 赵富王, 王宁, 苏雪萌, 等. 黄土丘陵区主要植物根系对土壤有机质和团聚体的影响[J]. 水保持学报, 2019, 33(5): 105-113. [Zhao Fuwang, Wang Ning, Su Xuemeng, et al. Effects of main plant roots on soil organic matter and aggregates in Loess Hilly Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(5): 105-113.]

[7] 戴雅婷, 闫志坚, 解继红, 等. 基于高通量测序的两种植被恢复类型根际土壤细菌多样性研究[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 735-748. [Dai Yating, Yan Zhijian, Xie Jihong, et al. Soil bacteria diversity in rhizosphere under two types of vegetation restoration based on high throughput sequencing[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 735-748.]

[8] 马静利, 马红彬, 沈艳, 等. 不同轮牧方式对荒漠草原土壤理化性质及草地健康的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 151-156. [Ma Jingli, Ma Hongbin, Shen Yan, et al. Effects of different rotational grazing methods on soil physical and chemical properties and steppe health in desert steppe[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 151-156.]

[9] 王方琳, 王理德, 韩富贵, 等. 石羊河下游民勤绿洲退耕地植被自然演替特征及物种多样性分析[J]. 西北植物学报, 2013, 33(7): 1459-1464. [Wang Fanglin, Wang Lide, Han Fugui, et al. Natural vegetation succession characteristics and species diversity in abandoned lands in the Minqin Oasis, downstream of the Shiyang River[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013, 33(7): 1459-1464.]

[10] 李永强, 焦树英, 赵萌莉, 等. 草甸草原撂荒地演替过程中植被多样性指数变化[J]. 中国草地学报, 2016, 38(3): 116-120. [Li Yongqiang, Jiao Shuying, Zhao Mengli, et al. Change of plant community diversity index during abandoned succession in meadow steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2016, 38(3): 116-120.]

[11] 于东伟, 雷泽勇, 赵国军, 等. 樟子松固沙林土壤理化特性对林分密度的响应[J]. 干旱区研究, 2020, 37(1): 134-141. [Yu Dongwei, Lei Zeyong, Zhao Guojun, et al. Response of soil physiochemical properties under sand-fixation forest of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* to stand density[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(1): 134-141.]

[12] 焦梦妍, 从怀军, 姚静, 等. 自然恢复序列梯度上退耕地土壤容重变化及其蓄水性能效应[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 128-133. [Jiao Mengyan, Cong Huaijun, Yao Jing, et al. Soil bulk density changes and its water-storage capacity of abandoned farmland in natural restoration series gradient of Loess hilly-gully region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 128-133.]

[13] 甘淼, 贾玉华, 李同川, 等. 黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析[J]. 干旱区研究, 2018, 35(2): 315-324. [Gan Miao, Jia Yuhua, Li Tongchuan, et al. Spatial variation of soil bulk density, saturated hydraulic conductivity and soil water content in a slope-gully unit of the northern Loess Plateau[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(2): 315-324.]

[14] 柴晓虹, 王理德, 姚拓, 等. 石羊河中下游不同退耕年限次生草地土壤理化及生物学特性研究[J]. 草业学报, 2015, 24(8): 24-34. [Chai Xiaohong, Wang Lide, Yao Tuo, et al. Effects of different years of cultivation abandonment on soil physical, chemical and microbial characteristics in the midstream and downstream of Shiyang River area[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2015, 24(8): 24-34.]

[15] 马俊梅, 满多清, 李得禄, 等. 干旱荒漠区退耕地植被演替及土壤水分变化[J]. 中国沙漠, 2018, 38(4): 800-807. [Ma Junmei, Man Duoqing, Li Delu, et al. Characteristics of vegetation succession and soil moisture in abandoned cropland of arid desert region[J]. Journal of Desert Research, 2018, 38(4): 800-807.]

[16] 王璐, 仲启铖, 陆颖, 等. 群落配置对滨海围垦区土壤理化性质的影响[J]. 土壤学报, 2014, 51(3): 638-647. [Wang Lu, Zhong Qicheng, Lu Ying, et al. Effects of configuration of plant community on physical and chemical properties of coastal polder soil[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(3): 638-647.]

[17] 王彦武, 罗玲, 张峰, 等. 河西绿洲荒漠过渡带梭梭林土壤保育效应[J]. 土壤学报, 2019, 56(3): 749-762. [Wang Yanwu, Luo Ling, Zhang Feng, et al. Soil conservation effect of *Haloxylon am-*

modendron Bushes in Hexi oasis-desert ecotone[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(3): 749-762.]

[18] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 69-77. [Huang Changyong. Soil Science[M]. Beijing: China Agricultural Science, 2000: 69-77.]

[19] 郭春秀, 王理德, 韩福贵, 等. 石羊河下游民勤绿洲不同年限退耕地土壤物理性质变化研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(27): 72-76. [Guo Cunxiu, Wang Lide, Han Fugui, et al. Studies of soil physical property of different abandoned lands in the Minqin Oasis, downstream of the Shiyang River[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(27): 72-76.]

[20] 宿婷婷, 马红彬, 周瑶, 等. 黄土丘陵典型草原土壤理化性质对生态恢复措施的响应[J]. 草业学报, 2019, 28(4): 34-46. [Su Tingting, Ma Hongbin, Zhou Yao, et al. Response of typical steppe grassland soil physical and chemical properties to various ecological restoration measures in the Ningxia Loess Hill Region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(4): 34-46.]

[21] 刘伟, 程积民, 高阳, 等. 黄土高原草地土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 2012, 49(1): 68-76. [Liu Wei, Cheng Jimin, Gao Yang, et al. Distribution of soil organic carbon in grassland on Loess Plateau and its influencing factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2012, 49(1): 68-76.]

[22] 安慧, 杨新国, 刘秉儒, 等. 荒漠草原区弃耕地植被演替过程中植物群落生物量及土壤养分变化[J]. 应用生态学报, 2011, 22(12): 3145-3149. [An Hui, Yang Xinguo, Liu Bingru, et al. Changes of plant community biomass and soil nutrients during the vegetation succession on abandoned cultivated land in desert steppe region[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(12): 3145-3149.]

[23] 隋媛媛, 杜峰, 张兴昌. 黄土丘陵区撂荒群落土壤速效养分空间变异性研究[J]. 草业学报, 2011, 20(2): 76-84. [Sui Yuanyuan, Du Feng, Zhang Xingchang. Spatial heterogeneity of available soil nutrients in abandoned ole-field communities in the Loess Hilly Region[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2011, 20(2): 76-84.]

[24] 由政, 张鹏, 薛莲, 等. 退耕地植被演替过程对土壤化学计量特征的影响[J]. 草地学报, 2017, 25(3): 657-661. [You Zheng, Zhang Peng, Xue Sha, et al. Effect of vegetation succession on abandoned cropland on soil stoichiometry characteristics[J]. Acta Agrestia Sinica, 2017, 25(3): 657-661.]

[25] 唐梦迎, 丁建丽, 夏楠, 等. 干旱区典型绿洲土壤有机质含量分布特征及其影响因素[J]. 土壤学报, 2017, 54(3): 759-766. [Tang Mengying, Ding Jianli, Xia Nan, et al. Distribution of soil organic matter content and its affecting factors in oases typical of arid region[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(3): 759-766.]

[26] 韩福贵, 王理德, 王芳琳, 等. 石羊河流域下游退耕地土壤酶活性及土壤肥力因子的相关性[J]. 土壤通报, 2014, 45(6): 1396-1401. [Han Fugui, Wang Lide, Wang Fanglin, et al. Analysis of relationship between soil enzymes activities and fertilities in the field of grain for green in downstream of the Shiyang River[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(6): 1396-1401.]

[27] 马瑞, 赵锦梅. 东祁连山河谷高寒草地植被群落特征及其与土壤性状的关系[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 374-381. [Ma Rui, Zhao Jinmei. Relationship between the grassland and soil conditions in the Eastern Qilian Mountains[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 374-381.]

[28] 王理德. 民勤退耕区次生草地植被及土壤系统演变研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2016. [Wang Lide. Evolution of Vegetation and Soil System on Secondary Grassland of Abandoned Land Area in Minqin[D]. Lanzhou: Gansu Agricultural University, 2016.]

[29] 王媚臻, 毕浩杰, 金锁, 等. 林分密度对云顶山柏木人工林林下物种多样性和土壤理化性质的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(3): 981-988. [Wang Meizhen, Bi Haojie, Jin Suo, et al. Effects of stand density on understory species diversity and soil physicochemical properties of a *Cupressus funebris* plantation in Yunding Mountain[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(3): 981-988.]

[30] 常海涛, 赵娟, 刘佳楠, 等. 退耕还林与还草对土壤理化性质及分形特征的影响——以宁夏荒漠草原为例[J]. 草业学报, 2019, 28(7): 14-25. [Chang Haitao, Zhao Juan, Liu Jianan, et al. Changes in soil physico-chemical properties and related fractal features during conversion of cropland into agroforestry and grassland: A case study of desertified steppe in Ningxia[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(7): 14-25.]

[31] 肖鹏飞, 张世熔, 黄丽琴, 等. 成都平原区土壤速效磷时空变化特征[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4): 89-92, 99. [Xiao Pengfei, Zhang Shirong, Huang Liqin, et al. Temporal-spatial variability of soil available phosphorus in Chengdu Plain[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(4): 89-92, 99.]

[32] 吕文强, 党宏忠, 王立, 等. 黄土高原带状植被土壤理化性质空间分异特征[J]. 草业学报, 2016, 25(10): 21-30. [Lyu Wenqiang, Dang Hongzhong, Wang Li, et al. The spatial differentiation of soil properties under banded vegetation systems on the Loess Plateau[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2016, 25(10): 21-30.]

Study on vegetation community characteristics and soil physical and chemical properties of abandoned land in Qingtu Lake

HE Hongsheng[1], TIAN Qing[1], WANG Lide[1,2], MENG Cunhong[3], HE Fanglan[2], GUO Chunxiu[2], WU Hao[2]

(1. College of Forestry, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Shiyanghe Forestry Headquarters in Wuwei of Gansu Province, Minqin 733399, Gansu, China)

Abstract: We selected arable areas with different years of abandonment (1 a, 2 a, 4 a, 8 a, 13 a, 20 a, 30 a, 40 a, and CK) as research objects and used the space-time substitution method to analyze the vegetation community and soil physical-chemical characteristics during the restoration period at the Qingtu Lake. Our results showed that 15 plant families, with 29 genera and 43 species appeared in our plots during the 40-year restoration process, with most species belonging to a few plant families and few species belonging to one dominant plant family. We divided the vegetation restoration process into four stages. The first rapid-recovery stage (grain for 1a to 2 a) is composed of annual and perennial root herbs; the second stage (grain for 2 a to 8 a) is composed of annual herbaceous and perennial herbaceous plants; in the third stage (grain for 8 a to 20 a), perennial herbaceous and perennial shrub are the most common species; and perennial shrubs dominate the fourth final succession stage (grain for 20 a to 40 a). In areas where farming activities were more intensive, the soil-water content was more volatile, with increasing and decreasing periods. In the final succession stage, the topsoil layer had more moisture in compasrison to the lower-soil layer. Independent of the restoration stage, the proportion of fine sand grains was the largest, followed by the proportion of powder grains, whereas the proportion of coarse sand grains and clay grains were the smallest, and these particle proportions did not change depending on time and intensity of farming activities. We observed that according to the intensity of the farming activities, both total nitrogen and organic matter showed a downward trend. Still, the soil's available potassium first increased and then decreased, whereas the available phosphorus showed the opposite trend. The surface aggregation phenomenon was evident. Finally, the succession of the vegetation community was closely related to soil physical-chemical properties. The Margalef richness index positively correlated with total soil nitrogen and organic matter, whereas the Shannon diversity index positively correlated with soil bulk density and fine sand particles and negatively correlated with soil clay and silt particles. The 4th year of the return of farming activity was crucial in the recovery process at Qingtu Lake.

Keywords: Qingtu Lake; abandoned land; vegetation community characteristics; soil physical and chemical properties